

挠力河流域平原区湿地景观完整性评价

李玉凤, 刘红玉*, 朱丽娟

(江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046)

摘要: 探讨一种景观完整性评价方法对湿地管理和保护非常重要。利用遥感和 GIS 技术, 选择 10 个指标构建景观完整性指数, 对挠力河流域平原区开展景观完整性评价。结果显示, 1950 年挠力河流域洪泛平原中的湿地景观完整性远好于 2005 年; 人类活动影响越强的区域湿地景观完整性越差; 2005 年仅河岸带湿地景观比其它区域具有较好的景观完整性。由于景观完整性指数包涵了必要的景观结构和功能完整性特征信息, 对评价景观尺度生态完整性, 诊断生态受损区域, 保护、恢复和管理湿地具有重要作用。

关键词: 湿地; 景观完整性评价; 挠力河流域

文章编号: 1000-0933(2009)09-4857-08 中图分类号: Q149 文献标识码: A

Landscape integrity assessment of wetlands in flood plain of Naoli Catchment, China

LI Yu-Feng, LIU Hong-Yu*, ZHU Li-Juan

Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction; College of Geographical Science; Nanjing Normal University; Nanjing 210046, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4857 ~ 4864.

Abstract: Ecological integrity is a key concept in natural resource management and environmental protection and can be defined as the capacity to support and maintain a balanced, integrative, adaptive biological system, having the full range of elements and processes in the natural habitat of a region at ecosystem scale. However, ecological integrity is difficult to measure at landscape scale. A practical index of landscape integrity must provide information on the status, condition, and spatial heterogeneity of ecosystems, and it needs to include indicators of functional as well as the structural attributes. Furthermore, landscape ecology has demonstrated the importance of considering landscape context in addition to local site attributes when explaining local ecological processes and ecological integrity. The main goal of our study was to develop a landscape integrity assessment measure for wetland management and conservation in the flood plain area of Naoli Catchment that have been highly impacted by human activities at landscape scale. Based on remote sensing data and GIS techniques, we selected 10 indicators (6 for structure and 4 for function of wetlands) to constitute the landscape integrity index proposed. The conclusions showed that wetlands in the flood plain area of Naoli Catchment in 1950 had more ecological integrity than those in 2005. More human influence resulted in less ecological integrity. The riparian wetlands had the best ecological integrity than other areas in the catchment in 2005. The landscape integrity index developed here has a number of essential characteristics that make it a useful tool to assess and maintain ecological integrity, diagnose possible causes of ecological impairment, establish criteria for protecting and restoring wetland ecosystems, and integrate catchment management at landscape scale.

Key Words: wetland; landscape integrity assessment; Naoli Catchment

基金项目: 国家高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070319001)

收稿日期: 2008-05-29; 修订日期: 2008-11-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuhongyu@njnu.edu.cn

区域资源与环境管理面临的最大挑战是如何评价区域内生态环境质量^[1]。从生态系统管理的角度寻求可持续发展答案,始于1972年,美国的“清洁水行动”提出的生态系统完整性评价方法^[2~5]。该方法是通过建立生物完整性指标(ABI)对生态系统完整性进行评价,以便保护完整的生态系统。最早界定生态系统完整性的含义是1977年 Cairns 等给出的定义:“完整性是维持一个特定区域生物群落的结构和功能特征,或者让社会感到满意。”因此,测量生态系统的完整性应该反映这个生态系统的组织状态。生态系统组织有两个不同的方面,结构和功能。结构是指系统组成成分之间的内在关联,功能是指生态系统的总体行为^[6]。此后,生态系统完整性评价得到快速应用和发展,成为度量生态系统质量的新方法。

但是,生态系统完整性评价强调的是生态系统尺度的结构、功能关系以及变化程度,重视的是生态系统内部相互作用的垂直关系。而任何一个生态系统都是存在于景观尺度内,若干生态系统不仅构成了景观,而且各生态系统之间存在着紧密的相互作用关系(水平关系)。只有保护了景观的生态完整性,才能真正保护生态系统的完整性。为此,如何评价景观尺度的生态完整性成为21世纪新的热点和难点问题。该方面研究是个崭新的领域,相关研究基本属于空白。本文以生态系统完整性理论为基础,应用景观生态学理论和方法,从景观结构和功能两方面入手,选择合适的景观指标测量景观完整性。探索一种新的景观完整性评价方法,揭示景观质量的空间差异,为保护、恢复和管理自然景观系统的完整性提供科学参考。

1 研究区域概况及数据来源

1.1 研究区域概况

挠力河流域是中国三江平原中的最大流域,位于完达山以北,属于山区-平原型流域,其中平原占65%,山区占35%^[7]。该区地处温带、湿润半湿润大陆性季风气候区,降水丰富。同时地势低平,各种碟形洼地广泛分布,使地表径流不畅,而且广泛分布的粘性土层阻碍地表水下渗,形成大面积沼泽。本文所选的平原区域主要由宽广的河漫滩、阶地和山前倾斜平原构成,并发育形成了复杂多样的湿地类型(图1)。该区大规模农业开发历史较短,但开发速度较快。1950年以来,该区经历了4次大规模农业开发活动,目前已造成87%的湿地丧失和景观结构的巨大变化。残留湿地仅占整个流域面积的7.1%,占平原面积的11%^[7],湿地景观完整性遭到了极强的破坏。

1.2 数据来源

研究区域的数据来源于2005年6~7月TM遥感解译的土地利用和湿地景观数据库,经过野外检验,其遥感影像解译的判读精度在90%以上^[8]。另外利用1935年日伪时期的1:10万地形图件(根据1935年出版的1:10万实测图,参照1945年1:10万修测图和1945年航摄照片于1947年编成,1954年翻印出版),提取湿地信息,得到1954年湿地景观和植被分布图,并以此代表该区湿地结构和功能处于较好状态的评价参照标准。

2 研究方法及其过程

2.1 湿地景观完整性指标的选择和计算

景观完整性评价指标的选择主要从两个方面确定。其一,景观结构完整性指标。景观结构的完整性如何判断是评价景观结构完整性的关键,本文选择能够反映景观结构完整性的指标包括:景观多样性指数、景观破碎化指数、景观分离度、景观形状指数等。这些指数能够从不同侧面反映景观结构及其变化,其计算方法参见相关文献^[9,10]。其二,景观功能完整性指标。景观功能的完整性表现在很多方面,总体分为生物环境功能和

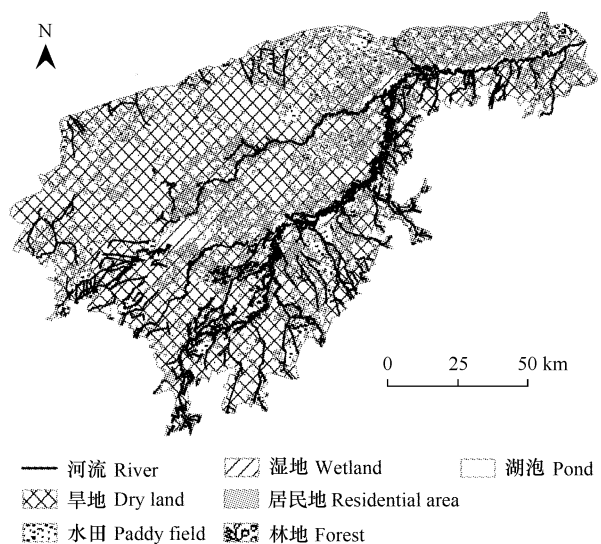


图1 挠力河流域平原区域景观分布图

Fig. 1 Landscape distribution of flat region in the Naoli watershed

非生物环境功能,而湿地的特殊景观结构决定了其功能主要表现在提供栖息地功能、植物物种维持功能、植物生产力功能和水质净化功能等方面^[11]。提供栖息地功能主要选择该区主要保护物种东方白鹳和丹顶鹤作为评价对象,根据干扰、食物和隐蔽物等因子确定物种的生境适宜性^[8];植物物种维持功能是指生态系统能够维持物种多样性的能力,通过植被多样性指数计算得到;植物生产力功能主要体现在植物生长状态的变化(高度、密度等),它主要包括湿地植被生产力和农作物生产力,该区从 20 世纪 50 年代就开始在试验场内进行监测,通过参考历史资料^[12]和计算 NDVI 指数得到植物生产力的空间数据;水质净化功能是湿地的另一重要生态功能,本文通过参考历史水质监测资料^[13]和近期水质资料^[14]确定区域水质的空间差异。

2.2 群组决策层次分析法(AHP)对评价指标权重的确定

本文主要选取 10 个评价因子,由景观结构和景观功能 2 个子系统构成。并通过 spss 软件的因子分析,发现各个指标之间的相关性均较差,能够满足 AHP 方法的要求。根据 AHP 方法把指标体系划分成 3 个层次(表 1),A 为目标层,B 为中间层,C 为指标层^[15],分别构建判别矩阵。由于各位专家的背景不同,因此本文选用群组决策 AHP 法来确定权重。

设在同一准则下指标相对重要性的两两判别矩阵是由 k 个($k > 3$)专家给出的,因此便有了 k 个判别矩阵。令 A_s 表示第 s 个专家给出的判别矩阵, a_{ijs} 表示 A_s 中的元素。这里允许 A_s 为残缺判断矩阵,残缺元素用“0”表示, ζ_{ij} 表示 k 个判别矩阵中位于第 i 行 j 列的不等于零的元素个数,AB 为由群组决策 AHP 法得到的综合判别矩阵, a_{ij} 表示 AB 中的元素,则 a_{ij} 可通过下式求得^[16,17]:

$$\lg a_{ij} = \frac{1}{\zeta_{ij}} \sum_{s=1}^{\zeta_{ij}} \lg a_{ijs} \quad (1)$$

在得到上述综合判断矩阵后,求其特征值和特征向量,并进行一致性检验。检验应根据判别矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 的一致性指标 CI,然后将 CI 与随机一致性指标 RI 进行比较,当 $CR = CI/RI < 0.10$ 时,则认为判别矩阵具有满意的一致性。

表 1 湿地景观完整性评价的各指标权重单排序值

Table 1 Weight values of the indices for evaluation of landscape integrity

A	B(中间层单排序结果 The single range for middle layer)		C(子权重单排序 The single range of weight)
景观完整性 Wetland Landscape integrity	结构指标 B ₁ Structure indices(0.5)	景观异质性 Landscape heterogeneity B ₁₁ (0.25)	景观多样性指数 C ₁ Landscape diversity index C ₁ (0.0750)
		景观空间格局 Landscape Spatial Pattern B ₁₂ (0.25)	景观破碎化 C ₂ Landscape fragmentation index C ₂ (0.1250)
			斑块丰富度 C ₃ Patch richness index C ₃ (0.0500)
			景观分离度 C ₄ Landscape isolation index C ₄ (0.1250)
			景观形状指数 C ₅ Landscape shape index C ₅ (0.0625)
	功能指标 B ₂ Function indices (0.5)	生物环境功能 Biotic environmental function B ₂₁ (0.375)	斑块密度 C ₆ Patch density C ₆ (0.0625)
			提供栖息地 C ₇ Habit supplies C ₇ (0.25)
			植物群落维持功能 C ₈ Plant community maintain C ₈ (0.0625)
		非生物环境功能 Abiotic environmental function B ₂₂ (0.125)	植物生产力 C ₉ Plant production C ₉ (0.0625)
			水质净化功能 C ₁₀ Purifying of water C ₁₀ (0.1250)

本研究选择 6 位专家进行判别矩阵的确定,目标层 A 对中间层 B 的矩阵就有 6 个,再通过公式(1)计算得到综合判别矩阵,同时计算出中间层 B 的单排序结果(表 1)。判别矩阵的一致性指标 $CI = 0$,表示判别矩阵具有完全一致性。

各位专家分别对中间层 B 和指标层 C 分别建立两两判别矩阵,用以上相同的方法计算出每个指标的权重值,如图 2。经过检验,表 1 中的层次单排序和图 2 中的总排序都符合一致性的要求,具有令人满意的一致性。

2.3 评价单元及其栅格数据叠加

根据挠力河流域平原区的范围(图 1),按照 3.0km ×3.0km 的尺度确定采样网格大小,将研究区域网格化,作为模型的数字计算的基础^[18,19],剔除采样网格内各景观类型面积总和低于 3.0 km² 的样方,最终得到的 1534 个网格样方,作为评价的最小单元。借助 VB 编程对所选指标进行空间采样的批处理,获得各类型指标的空间采样数据。

空间分析和空间数据管理是 GIS 的优势,本研究中用到的最主要的分析方法是空间插值和叠加。首先利用 ArcGIS 的空间分析模块制作出各指标的空间分布专题图;然后借助 ArcGIS 的栅格计算器,根据综合性指数计算公式进行各单项指标栅格图层的叠加运算,生成湿地景观完整性综合评价图。

2.4 评价结果等级的划分

由于各项指标数据性质,量纲不同,需要进行量化处理^[20]。对于指标值越大景观完整性越大的情况,可采用公式(2),反之,则采用公式(3):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{imin}}{x_{imax} - x_{imin}} \tag{2}$$

$$r_{ij} = \frac{x_{imax} - x_{ij}}{x_{imax} - x_{imin}} \tag{3}$$

按照公式对各项指标进行标准化处理。采用多级加权求和的方法来实现景观完整性的定量评价,再根据 ArcGIS 中等间距分类方法将评价结果划分为 5 级(表 2)。

表 2 景观完整性评价指标量化
Table 2 Criterion of landscape integrity assessment

等级 Classes	很好/弱(I) Very good/poor	好/弱(II) Good/Poor	一般(III) Fair	差/强(IV) Poor/Good	极差/强(V) Very poor/good
完整性 Integrity	0.860 ~ 0.734	0.734 ~ 0.608	0.608 ~ 0.482	0.482 ~ 0.365	0.365 ~ 0.230
结构指标分值 Structure indices scores	0.370 ~ 0.338	0.338 ~ 0.306	0.306 ~ 0.274	0.274 ~ 0.242	0.242 ~ 0.210
功能指标分值 Function indices scores	0.490 ~ 0.394	0.394 ~ 0.298	0.298 ~ 0.202	0.202 ~ 0.106	0.106 ~ 0.010

3 评价结果与分析

3.1 景观结构完整性空间差异

通过空间采样计算各个指标值,叠加处理后可以得到景观结构评价结果等级的空间显示。其中景观结构完整性是指不同生态系统和景观单元的空间关系,它在不同程度上反映了生态功能和动态变化。以 1950 年作为评价参照,通过图 3 分析显示,即使在人类开发强度很小的时期,区域内各个空间范围的景观结构等级并不是完全相同的,其景观结构完整性主要集中在很好等级 I 级,其面积占总面积的 98%;同时也显示,该时期没有景观结构差(IV)和极差(V)等级存在。

但是,通过对比图 3、图 4,得到 50 多年来区域湿地景观结构完整性发生很大变化。到 2005 年,仅有河岸带的湿地景观结构变化比较小,其他区域变化均比较大,尤其是河岸带周围地带,都是跨多级变化。在 2005 年景观结构等级中, I 级只占总面积的 6.59%, II 级占 30.73%, III 级占 23.53%, IV 级占 25.62%,可见目前一半以上面积的湿地景观结构完整性处于中等偏差等级。其中变化最多的是 I 级区域,在 1950 年景观结构

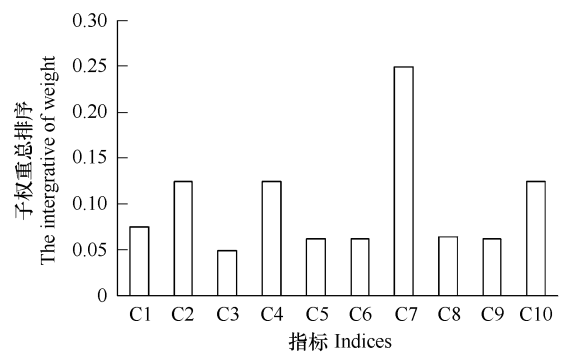


图 2 各评价指标权重总排序

Fig. 2 The integrative ranges of weight values of the indices for evaluation

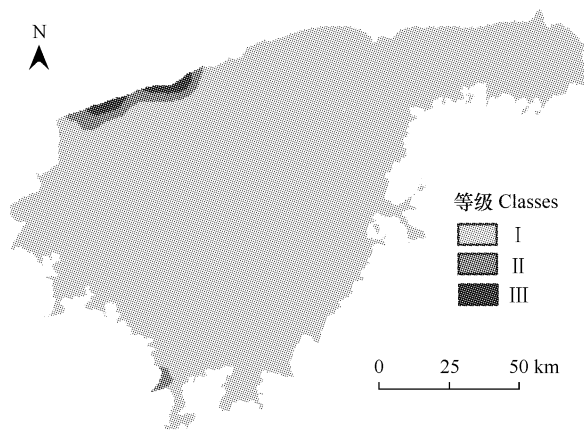


图3 1950 年景观结构完整性评价结果
Fig. 3 Map of assessment for landscape structure integrity in 1950

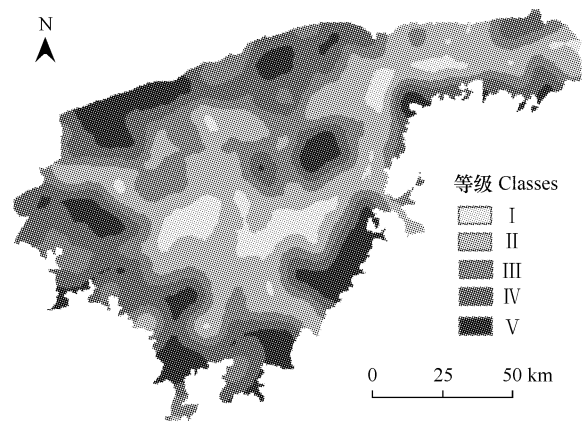


图4 2005 年景观结构完整性评价结果
Fig. 4 Map of assessment for landscape structure integrity in 2005

完整性为 I 级的面积占总面积 98%,而 50 多年后只剩下 6.59%,减少了 90% 以上(表 3)。这表明优质湿地景观结构完整性的变化比较严重,随着人类活动的不断深入,湿地景观结构完整性均向低等级转化。

表 3 景观结构与景观功能各等级所占比重

Table 3 The ratio of every range of landscape structure and landscape function

等级 Classes	很好 (I) Very good	好 (II) Good	一般 (III) Fair	差 (IV) Poor	极差 (V) Very poor
1950 年景观结构 Landscape structure in 1950	97.66%	1.60%	0.73%	0	0
2005 年景观结构 Landscape structure in 2005	6.59%	30.73%	23.53%	25.62%	13.52%
1950 年景观功能 Landscape function in 1950	39.93%	20.73%	31.35%	6.24%	1.75%
2005 年景观功能 Landscape function in 2005	0%	0.03%	8.90%	31.55%	59.52%
1950 年景观完整性 Landscape integrity in 1950	48.83%	40.38%	7.38%	3.32%	0.08%
2005 年景观完整性 Landscape integrity in 2005	0	0.84%	13.38%	42.41%	43.37%

3.2 景观功能完整性空间差异

以湿地为主的景观区域在受到人类大规模的长期干扰,景观结构和功能不断地发生改变。当人类干扰超过区域生态系统的自身调节能力或补偿功能时,会造成系统功能的破坏,导致生态系统退化。景观功能的完整性随着生态系统的退化而不断衰退。表 3 显示 1950 年历史状态的景观功能完整性等级主要是 I、II 和 III,大约占总面积的 90% 以上。同时通过图 5 可见,景观功能完整性 I 级的区域分布面积较大,主要分布在平原区内部,且围绕河流有广泛的分布,而功能完整性较差的区域主要集中在研究区的周边,所占面积不到 10%。可见,该时期景观功能的完整性基本处于良好状态。

由表 3 可见,2005 年景观功能完整性主要在 IV 和 V 级,大概占整个区域面积的 90%,几乎没有景观功能完整性 I、II 级的存在,III 级所占面积也只有 9%,这与 1950 年的景观完整性对比鲜明。通过对比图 5、6 可知,景观功能完整性在 50 多年时间内发生了明显变化。相对于其他区域,河岸带附近景观功能完整性衰退速率较远离河岸带的区域要缓(图 6)。

3.3 景观完整性综合评价

以 1950 年历史状态为景观完整性评价参照标准,叠加研究区域景观结构和景观功能完整性的评价结果,得出景观完整性综合评价结果(图 7 和图 8)。图 7 和图 8 显示,在人类开发强度较小的 1950 年,景观完整性空间分异特征明显,且主要以景观完整性较好的 I 级和 II 级为主,其面积约占总面积的 89%(表 3)。同时这个时期景观完整性等级极差(V)等级和差等级(IV)仅占总面积的 3.4%。整体上来讲,1950 年的景观完整

性处于比较优良的状态。

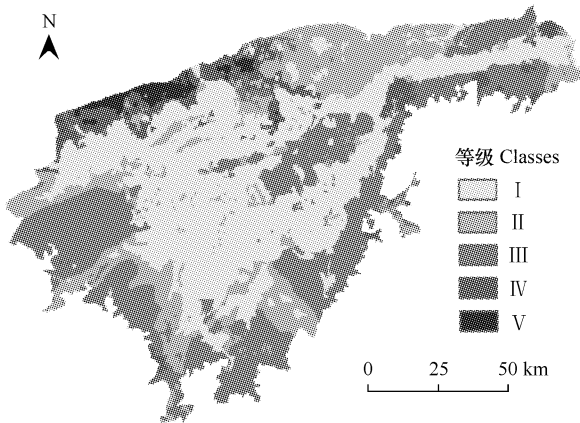


图5 1950年景观功能评价结果

Fig.5 Map of assessment for landscape function in 1950

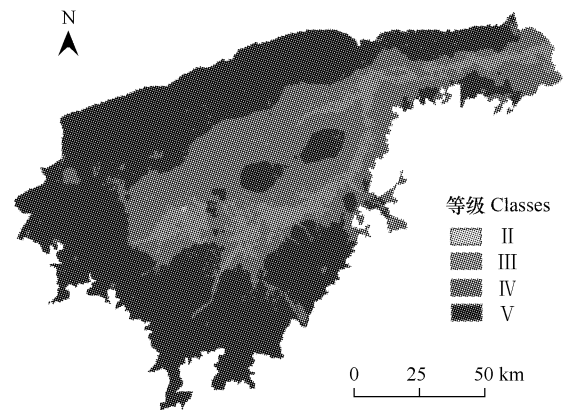


图6 2005年景观功能评价结果

Fig.6 Map of assessment for landscape function in 2005

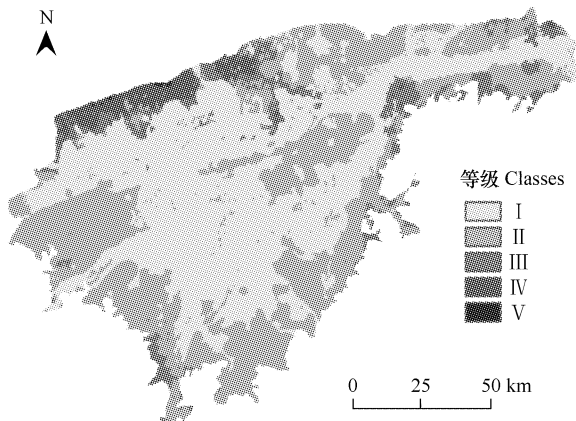


图7 1950年景观完整性综合评价结果

Fig.7 Map of integrated assessment for landscape integrity in 1950

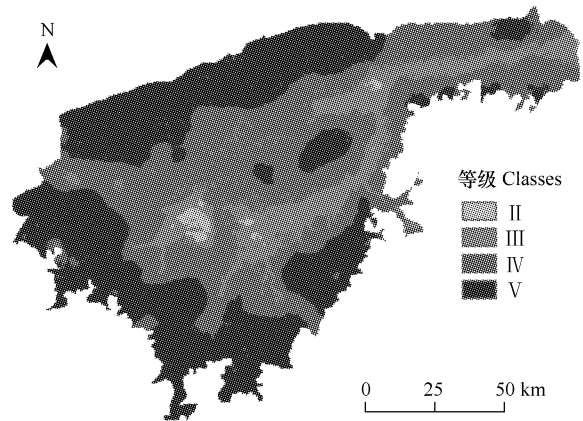


图8 2005年景观完整性评价结果

Fig.8 Map of integrated assessment for landscape integrity in 2005

随着人类活动的不断扩张,2005年景观完整性主要以差(Ⅳ)和极差(Ⅴ)为主,其面积占到总面积的86%,并且景观完整性为Ⅰ级的区域已经不存在,较好的Ⅱ、Ⅲ级的面积仅占14.22%(图8)。可见,该时期景观的完整性总体处于较差的状态。

4 结论与讨论

挠力河流域湿地开发始于建国之后,1950年挠力河流域湿地景观基本处于“原始”状态。以1950年挠力河流域湿地景观为参照标准,从景观结构和功能两个方面,对该流域2005年湿地景观完整性进行综合评价。其结果显示,1950年,挠力河流域湿地景观完整性以较好的Ⅰ级和Ⅱ级为主,其面积占总面积89%;2005年,其景观完整性变化为以较差的等级Ⅳ级和Ⅴ级为主,其面积占86%;并且仅河岸带湿地景观结构最完善,景观功能最好,保存了较好的景观完整性。其它区域由于人类干扰影响引起的景观结构改变和景观功能的退化,湿地景观完整性向河岸垂直方向呈梯度递减变化趋势。目前,该区湿地景观完整性不断下降,是导致生态环境质量改变的重要原因之一。因此,从提高景观完整性角度,扩大湿地景观斑块面积,增强景观多样性,减少景观空间隔离度和破碎化程度是提高景观结构完整性的关键;另外,减少人类活动干扰影响,在重要湿地保护区域实行退田还湿,扩大湿地面积是提高湿地景观功能完整性的重要内容。只有这样,才能全面提高湿地

景观完整性, 保护区域生态平衡。

在景观完整性评价中, 分别从景观结构完整性和景观功能完整性两方面考虑, 结合 RS 和 GIS 空间分析方法, 以空间单元网格为评价单元, 实现各个指标的空间化分析, 其结果简明直观, 能够较好地反映区域景观完整性空间差异特征和变化趋势。但是, 景观功能完整性的空间化要在大量实地监测的基础上构建, 本文主要参考前人做过的大量实地工作来实现景观功能的空间化。因此, 景观功能完整性评价还需深入细致地反映景观的具体突出功能。该方面是今后进一步研究的重点。

本文景观完整性的概念是在生态完整性和生物完整性的基础上建立起来的, 是景观尺度的生态完整性反映。另外, 该方法是选择历史作为参照标准来判断现状景观完整性, 选择的历史资料越早, 越有利于揭示现状景观完整性变化程度; 反之, 选择历史资料越近, 生态原始性越差, 反映的景观完整性变化越不明显。

References:

- [1] Huang B R, Ouyang Z Y, Zheng H, *et al.* Connotation of ecological integrity and its assessment method: a review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2196—2202.
- [2] Yan N L, Yu X G. Summary comments on ecosystem integrity. *Progress in Geography*, 2007, 26(1): 17—25.
- [3] Zhang M Y, Wang K L, He P. Advances in assessment of ecosystem integrity. *Tropical Geography*, 2005, 25(1): 10—18.
- [4] Yan N L, Zhao X H. Assessment of ecosystem integrity in headwaters of Yangtze River. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(5): 723—727.
- [5] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21—27.
- [6] Kay J J. *Ecological Integrity and the Management of Ecosystems*. Florida: St. Lucie Press, 1993. 210—212.
- [7] Liu H Y, Zhang S K, Lu X G. Processes of wetland landscape changes in Naoli River Basin Since 1980s. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(6): 698—705.
- [8] Liu H Y. Wetland landscape changes and its environmental effects. Beijing: Science Press, 2005. 84—91, 149—161.
- [9] Wu J G. *Landscape ecology: pattern, process, structure and scale*. Beijing: Higher Education Press, 2000. 99—109.
- [10] Chen L D, Fu B J, Wang J. Study on land use change in a small typical catchment in Loess Hilly area — a case study in Danangou catchment, Yan'an, Shanxi Province. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(1): 46—51.
- [11] Xiao D N, Hu Y M, Li X Z. *Landscape ecosystem study in deltaic wetland around Bohai Sea*. Beijing: Science Press, 2001. 8—9.
- [12] Ji Y H, Lü X G, Yang Q. Recent thirty years evolvement trend of *Calamagrostis angustifolia* community in Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(11): 1328—1332.
- [13] Huang X C. *Chinese mire study*. Beijing: Science Press, 1988. 120—135.
- [14] Liu H Y, Li Z F. Spatial characteristics of wetland water quality and land use impacts at spring in the small Sanjiang Plain, China. *China Environmental Science*, 2008, 28(10): 933—937.
- [15] Xu J H. *Mathematical Methods in Contemporary Geography*. Beijing: Higher Education Press, 2002. 224—279.
- [16] Zhao Q H, Li Q, Bu L Z. The application of AHP in appraising tender of engineering project. *Journal of Yangzhou University Natural Science Edition*, 2001, 4(3): 67—71.
- [17] Guo W M, Xiang J L, Xiao K S. Determination of weight coefficients in group AHP. *Journal of North China Institute of Technology*, 2000, 21(2): 110—113.
- [18] Zeng H, Liu G J. Analysis of regional ecology risk based on landscape structure. *China Environmental Science*, 1999, 19(9): 454—457.
- [19] Guo J P, Zhang Y X. Spatial Sampling Methods and Their Applications in Landscape Pattern Analysis for Landscape Ecological Research. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(5): 584—589.
- [20] Gao Z Q, Liu J Y, Zhuang D F. An analysis of eco environmental quality conditions of China's Land Resources. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(1): 93—96.

参考文献:

- [1] 黄宝荣, 欧阳志云, 郑华, 等. 生态系统完整性内涵及评价方法研究综述. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2196~2202.
- [2] 燕乃玲, 虞孝感. 生态系统完整性研究进展. *地理科学进展*, 2007, 26(1): 17~25.
- [3] 张明阳, 王克林, 何萍. 生态系统完整性评价研究进展. *热带地理*, 2005, 25(1): 10~18.
- [4] 燕乃玲, 赵秀华. 长江源区生态系统完整性测量与评价. *生态学杂志*, 2007, 26(5): 723~727.
- [7] 刘红玉, 张世奎, 吕宪国. 20 世纪 80 年代以来挠力河流域湿地景观变化过程研究. *自然资源学报*, 2002, 17(6): 698~705.

- [8] 刘红玉. 湿地景观变化与环境效应. 北京: 科学出版社, 2005. 84 ~ 91.
- [9] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2000. 99 ~ 109.
- [10] 陈利顶, 傅伯杰, 王军. 黄土丘陵区典型小流域土地利用变化研究——以陕西延安地区大南沟流域为例. 地理科学, 2001, 21 (1): 46 ~ 51.
- [11] 肖笃宁, 胡远满, 李秀珍. 环渤海三角洲湿地的景观生态学研究. 北京: 科学出版社, 2001. 8 ~ 9.
- [12] 汲玉河, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原小叶章群落近 30 年的动态变化. 生态学杂志, 2006, 25 (11): 1328 ~ 1332.
- [13] 黄锡畴. 中国沼泽研究. 北京: 科学出版社, 1988. 120 ~ 135.
- [14] 刘红玉, 李兆富. 小三江平原湿地水质空间分异与影响分析. 中国环境科学, 2008, 28 (10): 933 ~ 937.
- [15] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 北京: 高等教育出版社, 2002. 224 ~ 279.
- [16] 赵庆华, 李泉, 卜龙章. 群组决策层次分析在工程项目评标中的应用. 扬州大学学报 (自然科学版), 2001, 4 (3): 67 ~ 71.
- [17] 郭文明, 相景丽, 肖凯生. 群组 AHP 权重系数的确定. 华北工学院学报, 2000, 21 (2): 110 ~ 113.
- [18] 曾辉, 刘国军. 基于景观结构的区域生态风险分析. 中国环境科学, 1999, 19 (9): 454 ~ 457.
- [19] 郭晋平, 张芸香. 景观格局分析空间取样方法及其应用. 地理科学, 2005, 25 (5): 584 ~ 589.
- [20] 高志强, 刘纪远, 庄大方. 中国土地资源生态环境质量状况分析. 自然资源学报, 1999, 14 (1): 93 ~ 96.